

(論文)

交流ソレノイド部品への純鉄系軟磁性細線の適用効果検証

飯村 奨太*1・森田 晋也*1・笠井 信吾*2

Effect Verification of Pure Iron-based Soft Magnetic Thin Wire Applied to AC Solenoid Parts

Shota IIMURA・Shinya MORITA・Shingo KASAI

要旨

当社の純鉄系軟磁性材料は、自動車のリニアソレノイドや電磁リレーなど、直流駆動の電磁部品に多く使用されているが、近年の電動化に伴い、交流駆動に適した磁性材料の開発が求められている。交流磁界下で応答性を向上させるには、材料内部に発生する渦電流を抑制する必要がある。今回、線径を細くすることで渦電流の抑制を狙った純鉄系軟磁性細線を開発し、交流ソレノイド部品を用いて効果を検証した結果、線径1 mm程度の細線を束ねた可動鉄心の方が、従来のバルク製鉄心よりストローク量が向上することを確認した。また、周波数を2倍とし応答性良く駆動させることで、単位時間当たりの鉄心移動量が3倍となる結果を得た。今後需要の増加が想定される交流駆動の電磁部品へ、軟磁性細線の適用による応答性向上が期待できると考えられる。

Abstract

Kobe Steel's pure-iron-based soft magnetic materials are widely used in direct-current-driven electromagnetic components, such as linear solenoids and electromagnetic relays in automobiles. With the recent trend toward electrification, there is a demand for the development of magnetic materials suitable for alternating current drive. To improve the responsiveness under alternating magnetic fields, the eddy current generated inside the material must be suppressed. Hence, a pure-iron-based soft magnetic thin wire has been developed to suppress eddy currents by reducing the wire diameter. The results of effectiveness verification using an alternating current solenoid component show that a movable iron core made of bundled thin wires with a wire diameter of approximately 1 mm demonstrates greater stroke volume than the conventional bulk iron core. In addition, the iron core movement per unit time has been tripled by doubling the frequency and driving with improved responsiveness. Demand for alternating-current-driven electromagnetic components is expected to increase in the future, and the application of soft magnetic thin wire will improve their responsiveness.

検索用キーワード

軟磁性材料, 軟磁性細線, ソレノイド, 電磁ポンプ, モータ

まえがき = 近年、環境問題が盛んに議論されるようになり、気候変動対策としてCO₂排出量削減を目的とした電動化の流れが自動車分野においても進展している¹⁾。電動化により、自動車に搭載される電磁部品の高性能化や多様化が進む中、当社は鉄本来の磁気特性を最大限に活用した純鉄系軟磁性材料を、駆動周波数や部品形状に適した形態で提案可能な体制を構築中である。駆動周波数域と磁束密度域のイメージならびに想定される電磁部品を図1に示す。当社では、リニアソレノイドや電磁リレーなど直流駆動の電磁部品に実績のある「ELCH2シリーズ」(線材・棒鋼)^{2),3)}や、電装系など高周波数域での駆動に適した「マグメル」(鉄粉)⁴⁾に加え、線径や板厚を小さくすることで渦電流を抑制し、モータなどの駆動周波数域への適用を可能とした「純鉄系軟磁性細線(以降、純鉄細線という)」⁵⁾や「純鉄系軟磁性鋼板」⁶⁾を開発している。

筆者らは従前、純鉄細線を束ねたコアを有するアキシヤルギャップモータを開発し、小型軽量化が期待できることを報告した⁵⁾。いっぽう、純鉄細線は、交流ソレノ

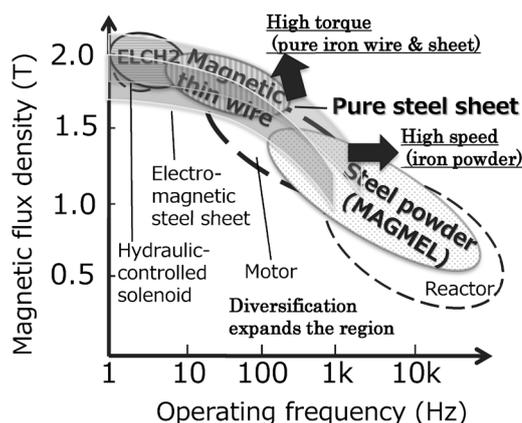


図1 駆動周波数域と磁束密度
Fig.1 Operating frequency range and magnetic flux density

イドなど交流駆動の電磁部品の応答性向上にも寄与できると考えられ、本稿では、純鉄細線を束ねた可動鉄心を有する交流ソレノイドの解析ならびに実機評価により検証した結果について述べる。

*1 技術開発本部 応用物理研究所 *2 鉄鋼アルミ事業部門 線材条鋼ユニット

1. 純鉄系軟磁性細線

純鉄細線は当社製品群の中でも、合金添加元素を極力排除し、強磁性の起源となる磁気モーメントを最大限活用したELCH2を冷間伸線により細線化した材料である。式(1)は交流磁界下において材料内部に発生する渦電流の大きさを示した式である。

$$P_v \propto (\pi f B_m d)^2 / \rho \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 P_v は渦電流損、 f は周波数、 B_m は磁束密度振幅、 d は磁性体直径、 ρ は磁性体の電気抵抗率である。

式(1)より、材料内部に発生する渦電流は磁性体直径の2乗に比例、電気抵抗率に反比例する。したがって、図2のように細線化し束ねることで、高磁束密度を維持しながら、線間の接触抵抗あるいは絶縁被膜により渦電流を抑制できるのが純鉄細線のコンセプトである。表1に純鉄細線とJIS C 2552で定める無方向性電磁鋼板35A300と50A600の磁気特性ならびに鉄損を示す。電磁鋼板と比較した際、鉄損はやや高い傾向にあるが、純鉄系の特徴を活かし磁束密度は高い値を示す。線径を ϕ 0.4 mmまで細くすれば、高磁束密度を維持しながら、対辺1.2 mmの約1/3まで鉄損が低減できる。また、純鉄細線の特徴として、曲げ加工や異形線による形状自由度の高さがあり、例えば細線を曲げて配置を工夫することで三次元的な磁路形成が可能である点や、純鉄系の優れた冷間加工性を活かして正六角形状にすることで束成形の占積率向上やせん断力に対して束が位置ずれしにくいなどの効果も得られる。また、細線を束ねてコアを成形するため、板形状の材料と比較し打ち抜きなどの加工

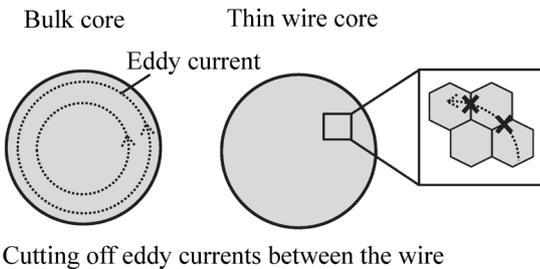


図2 材料内部で生じる渦電流の模式図
Fig.2 Schematic diagram of eddy currents occurring within the material

が不要で、材料歩留まりを高められるという特徴がある。

2. 交流ソレノイドへの細線適用効果解析

交流ソレノイドへ細線を適用した際の効果を、市販の電磁界解析ソフトJMAG (ver21.1, 株式会社JSOLの登録商標)を用いて検証した。図3に示すヨーク、コイル、可動鉄心ならびに可動鉄心ガイドからなる交流ソレノイドモデルを作製し、可動鉄心はバルク製と細線製をそれぞれ用意した。本稿では、解析検証やものづくりのしやすさを優先し、可動鉄心には対辺1.2 mmの六角細線を採用した。

表2に示す形状および解析条件で、コイル通電時に可動鉄心に働く電磁力を過渡解析し、電磁力の時間変化や、可動鉄心内部で発生する渦電流を検証した。図4は計算された可動鉄心に働く電磁力の時間変化である。コイル通電開始から細線製鉄心の方が電磁力の立ち上がりが高く、0.01 s後にはバルク製鉄心に対しておよそ10%高くなることが確認された。0.01 sにおける可動鉄心内

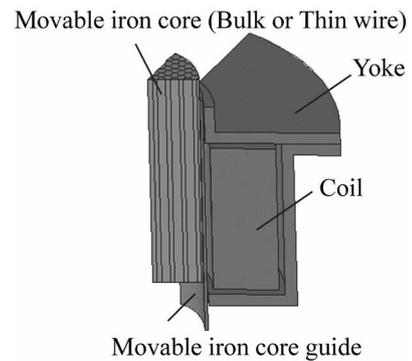


図3 交流ソレノイドの電磁界解析モデル
Fig.3 Electromagnetic field analysis model of AC solenoid

表2 電磁界解析条件
Table 2 Electromagnetic field analysis conditions

Movable iron core shape	D=16.4 mm
Coil turn	364 T
Coil resistance	2.53 Ω
Yoke material	S45C
Movable iron core guide material	SUS304
Movable iron core material	ELCH2(opposite side=1.2mm)

表1 純鉄系軟磁性材料の磁気特性と鉄損例

Table 1 Magnetic properties and iron loss examples of pure iron-based soft magnetic materials

Material	Magnetic flux density (T)			Iron loss (W/kg) W ₁₅₅₀
	B ₂₅ 2,500A/m	B ₅₀ 5,000A/m	B ₁₀₀ 10,000A/m	
Hexagonal thin wire(d=1.2mm)	1.65	1.75	1.87	11
Hexagonal thin wire(d=0.7mm)	1.63	1.71	1.84	5.4
Circle thin wire (d=0.4mm)	1.62	1.73	-	3.6
35A300(JIS)	>1.49	>1.60	>1.70	<3.0
50A600(JIS)	>1.57	>1.66	>1.76	<6.0

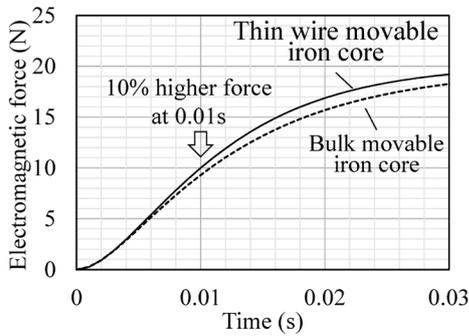


図4 可動鉄心に働く電磁力の時間変化

Fig.4 Time variation of electromagnetic force acting on the movable iron core

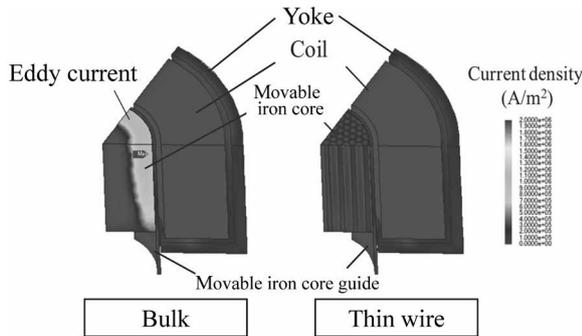


図5 励磁0.01 s後の可動鉄心内部の渦電流密度分布

Fig.5 Distribution of eddy current density inside the movable iron core after 0.01 s of excitation

部の渦電流密度を、バルク製鉄心と細線製鉄心で比較した結果を図5に示す。バルク製鉄心内部では表層を主として渦電流が発生し、渦電流がつくる磁界がコイルによる磁界を一部打ち消すことで、電磁力の応答性が悪化したと考えられる。いっぽう、細線製鉄心内部では渦電流が大幅に抑制され、バルク製鉄心に対し渦電流損を90%以上低減することが確認された。そのため、0.01 s時点での電磁力がバルク製鉄心に比べ10%高くなったと考えられる。以上より、交流ソレノイドの可動鉄心へ純鉄細線を適用することで、鉄心内部の渦電流抑制および鉄心応答性向上が期待できることを確認した。

3. 細線製鉄心の作製および実機評価試験

細線製鉄心の応答性向上効果を実機検証するために、細線製の可動鉄心を作製した。鉄心の外観写真ならびに純鉄細線が束ねられた様子を図6に示す。用意した純鉄細線はφ5 mmのELCH2線材を対辺1.2 mmの六角形状まで冷間伸線加工したものであり、矯正加工後、可動鉄心の長さ41 mmに切断した。冷間加工による組織劣化の改善ならびに磁気特性向上のために850℃×3 hの磁気焼鈍を施し、厚さ0.2 mmのSUS製の薄肉パイプ内で約130本束ねた後、接着剤により固定した。細線束のみでの占積率は本来95%以上となるが、パイプと細線の間隙が生じ、重量から見積もった占積率は88%に留まった。こちらは外周に該当する細線を細くするなど、隙間を小さくする工夫により占積率の改善は可能である。また、比較検証用にELCH2棒鋼から切削加工したバルク製鉄心も用意した。

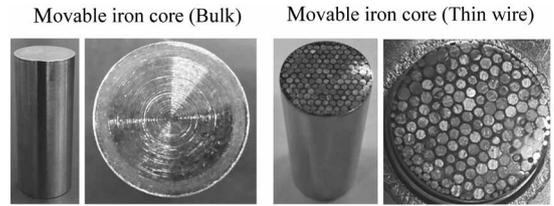


図6 作製したバルク製鉄心ならびに細線製鉄心

Fig.6 Manufactured bulk movable iron core and thin wire movable iron core

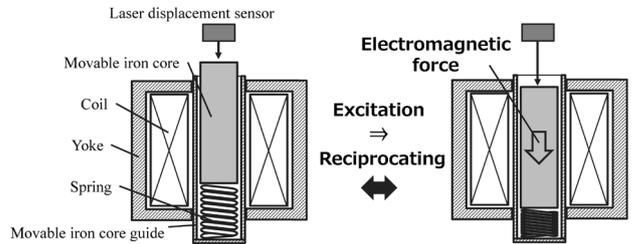


図7 交流ソレノイドの模式図

Fig.7 Schematic diagram of AC solenoid

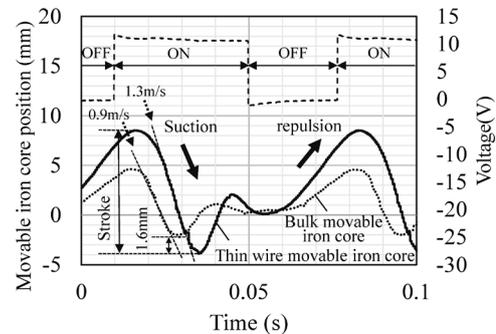


図8 15 Hz駆動時の可動鉄心の変位

Fig.8 Displacement of the movable iron core at 15 Hz drive

実機検証に用いた交流ソレノイドの模式図を図7に示す。図に示すとおり、ヨーク、コイル、可動鉄心、可動鉄心ガイド、ばねから構成される。コイルに電流が印加されれば、可動鉄心には図中下向きに電磁力が働き、鉄心下部のばね方向へ吸引される。コイルへの通電がなくなれば鉄心の電磁力は消失し、ばねにより上部へ反発される。矩形(くけい)波などの交流電流を印加すれば、可動鉄心は上下に往復運動を繰り返す。本稿では、往復運動する可動鉄心位置をその上部に設置したレーザ変位計で読み取り、鉄心位置の時間変化ならびにストローク量により細線適用効果を検証した。

図8にDuty比(電圧ON期間/全期間)0.6、駆動周波数15 Hzでコイルに12 V印加した際の可動鉄心位置の時間変化を示す。電圧ONと同時にバルク製鉄心も細線製鉄心もばね方向に吸引されるが、バルク製鉄心の速度が0.9 m/sに対して、細線製鉄心は1.3 m/sであり40%以上速度が高い。その結果、ばねを強く押し込み、吸引時の鉄心移動量が距離にして1.6 mm伸びている。その後、吸引力とばねによる反発力とのつり合い位置にて電圧がOFFになれば、細線製鉄心はバルク製鉄心よりも早く応答し、結果として往路ならびに復路の両方で移動量が増え、ストローク量が80%大きくなった。図9に駆動

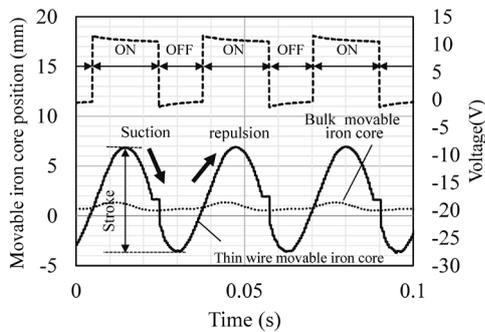


図9 30 Hz 駆動時の可動鉄心の変位

Fig.9 Displacement of the movable iron core at 30 Hz drive

周波数を 15 Hz から 30 Hz と倍にした際の可動鉄心位置の時間変化を示す。駆動周波数を倍にすることでバルク製鉄心のストローク量はおよそ 10% まで大きく低減するが、細線製鉄心は僅かに低減するのみである。駆動周波数が高くなることでバルク製鉄心では、その内部に生じる渦電流が大きくなり、鉄心に働く電磁力が低減し追従性を失ったと考えられるが、細線製鉄心は線間で渦電流を抑制できるため、倍の周波数にも対応できたと考えられる。単位時間当たりの鉄心移動量（ストローク量×駆動周波数）をまとめたものが図10であり、バルク製鉄心の 15 Hz と比較し、細線製鉄心の 30 Hz は鉄心の移動量が約 3 倍となる結果を得た。これは、例えば電磁ポンプに細線製可動鉄心を適用することで、液体送給量が増大できることを示している。

むすび = 純鉄系軟磁性細線を束ねることにより渦電流を抑制した可動鉄心を交流ソレノイドに用いることで、鉄心の応答性が向上しストローク量が増加する結果を示し

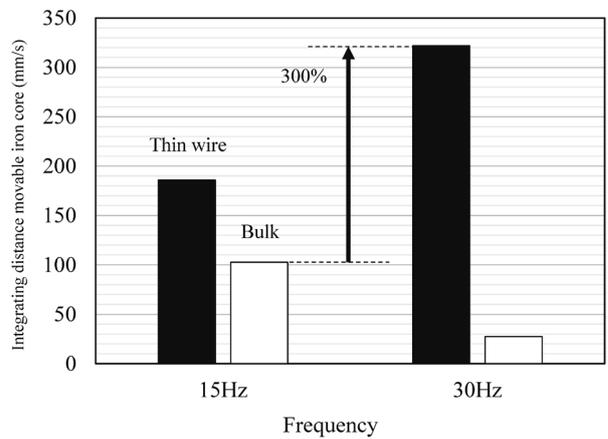


図10 単位時間当たりの可動鉄心移動量

Fig.10 Movement amount of the movable iron core per unit time

た。さらには、駆動周波数を高めることにより、単位時間当たりの鉄心の移動量が約 3 倍となる結果が得られた。また、電磁部品の高性能化を示すいっぽうで、本結果は小型・軽量化や省電力にも寄与できる。本稿で紹介した交流ソレノイドへの適用や、従前の取り組みであるモータへの適用などは純鉄細線の活用の一例であり、今後も材料開発や新たな活用方法を考案することで、自動車の性能向上ならびに環境負荷低減へ貢献していく。

参考文献

- 1) 経済産業省. 自動車新時代戦略会議(第1回)資料. 2018.
- 2) 千葉政道ほか. R&D神戸製鋼技報. 2002, Vol.52, No.3, p.66-69.
- 3) 坂田昌之ほか. R&D神戸製鋼技報. 2015, Vol.65, No.2, p.6-11.
- 4) 加藤弘樹ほか. R&D神戸製鋼技報. 2022, Vol.71, No.2, p.12-17.
- 5) 森田晋也ほか. R&D神戸製鋼技報. 2022, Vol.71, No.2, p.7-11.
- 6) 土田武広ほか. R&D神戸製鋼技報. 2022, Vol.71, No.2, p.18-21.